第 39 卷 第 5 期
2022 年 10 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 5
Oct. 2022

文章编号:1000-4939(2022)05-0958-07

多胞管增强泡沫铝复合结构的压缩和吸能性能研究

田陈[1],黄磊[2,3],刘韡[1],张志家[2,3],李斌潮[4],张钱城[2,3],金峰[2,3]

(1. 西安建筑科技大学理学院,710075 西安;2. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,710049 西安;
3. 西安交通大学多功能材料与结构教育部重点实验室,710049 西安;
4. 西安航天动力研究所液体火箭发动机技术国防科技重点实验室,710100 西安)

摘　要:针对泡沫铝强度较低、吸能性能弱的问题,提出了一种有效的增强办法:将金属多胞管填充至泡沫铝中,并用环氧胶固定,制备出新型多胞管增强泡沫铝复合结构(MTRF)。通过实验和商业有限元软件 ABAQUS/explicit 研究了该类复合结构的压缩和吸能性能。实验结果表明:与常规泡沫铝相比,多胞管增强泡沫铝复合结构的抗压强度和单位质量吸能性能分别提升了 500% 和 700%,显示了 MTRF 结构优越的承载能力和能量吸收性能。同时,实验结果验证了有限元模型的准确性。在此基础上数值研究了 MTRF 的增强机理,结果表明:泡沫铝为多胞管提供了强的侧向支撑,抑制了其在压缩载荷作用下横向变形,使得变形模式由低阶变形模式向高阶的变形模式转变,即表现为塑性铰数目增多,使得 MTRF 结构承载和吸能性能显著提高。

关键词:泡沫铝;多胞管;抗压强度;吸能性能;增强机理

中图分类号:U467.14　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.018

Compression and energy absorbing properties of multi-cell tube reinforced aluminum foam

TIAN Chen[1], HUANG Lei[2,3], LIU Wei[1], ZHANG Zhijia[2,3], LI Binchao[4], ZHANG Qiancheng[2,3], JIN Feng[2,3]

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, 710075 Xi'an, China;
2. State Key Laboratory for Mechanical Structure Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;
3. MOE Key Laboratory for Multifunctional Materials and Structures, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;
4. State Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Rocket Engine,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, 710100 Xi'an, China)

Abstract: Aiming at low strength and weak energy absorption of aluminum foam, this paper proposes an effective method to enhance aluminum foam: filling metallic multicellular tube into pre-perforated aluminum foam and fixing it with epoxy resin to prepare a new multi-cell tube reinforced aluminum foam composite

收稿日期:2021-06-08　　**修回日期**:2022-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12072250);装发部预先研究项目(No. 41410040202);机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题资助项目(No. SV2019-KF-28);基础加强计划技术领域基金资助项目(No. 2019-JCJQ-JJ-480);中国博士后特别资助(站前)项目(No. 2020TQ0238);陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(No. 2020KJXX-020)

通信作者:张钱城。E-mail:zqc111999@xjtu.edu.cn

引用格式:田陈,黄磊,刘韡,等. 多胞管增强泡沫铝复合结构的压缩和吸能性能研究[J]. 应用力学学报,2022,39(5):958-964.
TIAN Chen, HUANG Lei, LIU Wei, et al. Compression and energy absorbing properties of multi-cell tube reinforced aluminum foam[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(5):958-964.

structure (MTRF). The compression and energy absorption properties of the composite structure were studied by experiment and commercial finite element software ABAQUS/explicit. The experimental results show that compared with those of aluminum foam, the compressive strength and unit mass energy absorption performance of multi-cell tube reinforced aluminum foam structure are increased by 500% and 700%, respectively, indicating the excellent load carrying capacity and energy absorption performance of MTRF structure. Meanwhile, the experimental results verify the accuracy of the finite element model. Based on this, the enhancement mechanism of MTRF is studied by Abaqus/Explicit. The numerical results show that the foam aluminum provides enough lateral support for the multi-cell tube, restraining its lateral deformation under compression load, and makes the deformation mode change from the low order deformation mode to the higher order deformation mode. That is, the number of plastic hinge increases, resulting in a significant increase in the carrying capacity and energy absorption of the MTRF.

Key words: aluminum foam; finite element analysis; compressive strength; energy absorption performance; enhancement mechanism

泡沫铝由于具有轻质、高比强度、高比刚度、隔热以及缓冲吸能等特性[1-3]，在轻量化结构和能量吸收功能应用领域获得了广泛研究和应用。然而，尽管现有的制备工艺能控制泡沫铝密度和孔结构[4]，但由于制造缺陷限制其承载能力和吸能性能[5]，因此，如何改进泡沫铝及其制品的力学性能成为近年来的热点问题。

一种方案是金属泡沫基体里添加微纳米增强相。例如 Kennedy 等[6]和 Du 等[7]分别在泡沫铝中加入微米级的 TiB_2、SiC 颗粒；且实验结果表明，通过提高颗粒浓度，泡沫铝材料的力学性能得到增强；另外，Brothers 等[8]采用粉末冶金发泡工艺制备了纳米 SiC 颗粒增强的泡沫铝，Salehi 等[9]制备了原位生成 SiO_2 纳米粒子增强的铝泡沫，使得泡沫铝力学性能显著改善。

另一种方案采用将泡沫铝与其他高强度的部件复合的方法。例如，Wang 等[10]研究了泡沫铝填充帽状管在冲击载荷下的变形行为，发现填充泡沫铝使得整体结构的比吸能得到提升；Hanssen 等[11]实验研究了泡沫铝填充管准静态三点弯曲性能，发现增大填充泡沫铝的密度可以提高填充结构的抗弯强度；Xu 等[12]将碳纳米管（carbon nanotube, CNT）增强的泡沫铝插入 6061 铝合金空管中制备了 C-FFT 复合结构，并通过单轴压缩实验研究发现其压缩性能和能量吸收性能得到显著提升；Yang 等[13]对泡沫铝填充的铝合金管复合结构在 25 ~ 250 ℃温度范围内进行了准静态压缩实验，发现温度高于 150 ℃时，结构的变形模式发生了改变；杨旭东等[14]研究了泡沫铝填充 CFRP 复合材料薄壁管在 25 ~ 150 ℃温度范围下的压缩与吸能性能，发现泡沫铝对结构的增强作用在高温下表现更为显著。

对于泡沫铝填充管结构，泡沫铝为钢管内壁提供了足够的侧向支撑，使钢管的屈曲波长更短，增强了塑性角弯曲吸能，因此导致了结构力学性能的提升[15]。基于这种机理，本研究开发了一种新型多胞管增强泡沫铝结构（multi-cell tube reinforced aluminum foam, MTRF），提出了将吸能性能优于单胞管[16]的金属多胞管埋入泡沫铝的构想，进一步增强泡沫铝-管壁耦合作用，以至更有效地提高泡沫铝结构的力学性能。首先，通过准静态压缩实验和仿真分析，对已提出结构的压缩和吸能性能进行研究；进一步地，结合仿真分析手段，对 MTRF 结构性能提升的机理进行详细阐述。

1　多胞管增强泡沫铝复合结构的制备

所提出的一种新型多胞管增强泡沫铝复合结构（MTRF）的设计和制造如图 1 所示。制备过程分为 3 步：首先，选择通过熔体发泡法制备的商用闭孔泡沫铝板，其密度为 400 kg/m^3，平均泡沫孔尺寸为 2 mm，采用线切割技术，分别制备泡沫铝块、中心通孔的泡沫铝圆筒；同时，以 6061 铝合金为原材料，采用挤压成型技术制备 6061 铝合金十字型多胞圆管（circular multicellular tube, CMT），其外径与制备的泡沫铝圆筒的中心通孔尺寸一致；最后将十字型多胞圆管（CMT）、中心通孔的泡沫铝圆筒、泡沫铝块进行组装，并用环氧胶胶接，获得十字型多胞圆管（CMT）、多胞管增强泡沫铝结构（MTRF）的典型试



样,其图片及其几何参数如图 2 所示。试样结构具体的几何尺寸如表 1 所示。

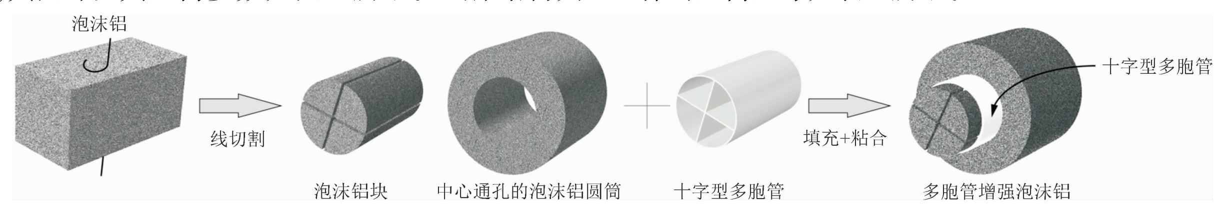


图 1 复合结构制备过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure preparation process

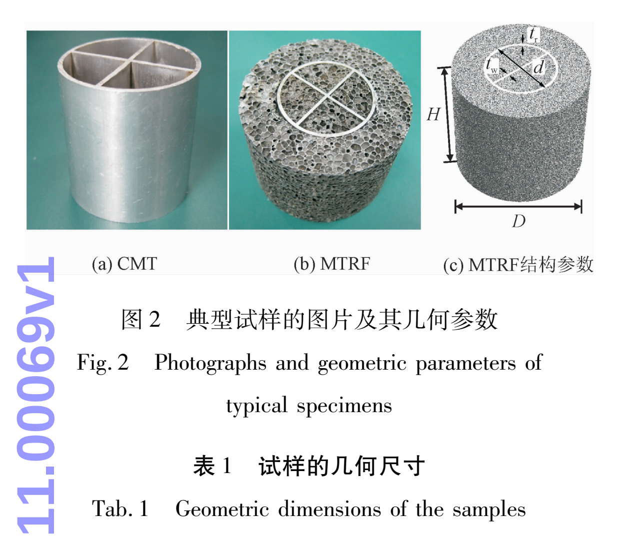


图 2 典型试样的图片及其几何参数

Fig. 2 Photographs and geometric parameters of typical specimens

表 1 试样的几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of the samples

试件	质量/g	d/mm	D/mm	t_r/mm	t_w/mm	H/mm
CMT	16.57	15	–	1	1	42
MTRF	60.8	15	28	1	1	42
AF	44.3	–	28	–	–	42

2 准静态轴向压缩实验

在室温环境下采用液压试验机(MTS-880/25T, MTS Corporation, USA)对制备的试样进行准静态轴向压缩测试,如图 3 所示。试件被放在两个压头之间。实验期间,下压头固定,而上压头以 1 mm/min 的速度向上移动,名义应变率小于 $1 \times 10^{-3} s^{-1}$,以确保执行准静态压缩测试。期间 MTS 机以 10 个/秒速度采集压缩载荷和压缩位移数据。在整个实验过程中,压缩变形量至少达到 60% 的高度。每次测量至少重复 3 次并取得平均值。为了研究试件的变形和破坏模式,采用摄像机记录了每个试件不同应变下的变形过程。

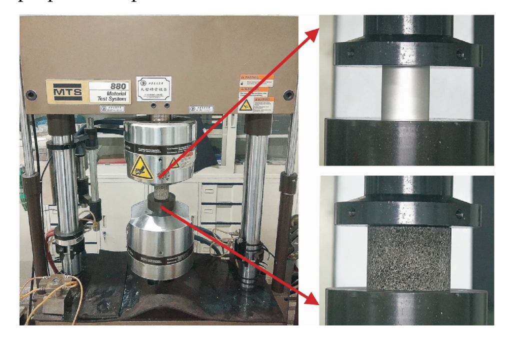


图 3 轴向压缩实验

Fig. 3 Axial compression test

3 有限元模型

为了进一步研究 MTRF 复合结构的强化机理和变形机制,使用 ABAQUS 有限元软件建立了 MTRF 复合结构的轴向压缩有限元模型,如图 4 所示。泡沫铝采用 8 节点实体单元(C3D8R)建模。采用线性四边形壳单元(S4R)对铝合金多胞管、上、下刚性板进行了建模。上刚性板除 3 方向外,其余各自由度均约束,下刚性板固定。仿真压缩速度设置为 2 mm/s。采用带罚摩擦公式的一般接触模型来模拟结构的相互作用,摩擦系数设为 0.2。其次进行了网格收敛性验证,多胞管的网格尺寸设定为 0.5 mm,泡沫铝的网格尺寸选择为 1 mm,网格单元总数目为 127 680。有限元模型中使用的材料参数如表 2 所示,采用弹塑性本构模型模拟多胞管和泡沫铝的力学行为。

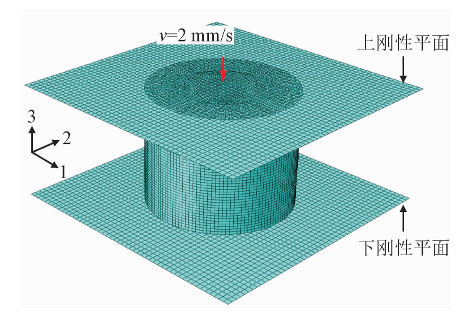


图 4 MTRF 结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of MTRF subjected to axial loads

表 2　6061 铝合金与泡沫铝的材料参数

Tab. 2　Material parameters of 6061 aluminum alloy and aluminum foam

材料	密度/(kg · m^{-3})	杨氏模量/GPa	屈服应力/MPa	泊松比
Al 6061	2 700	70	245	0.3
泡沫铝	400	11	2.85	0.11

4　结果与分析

4.1　实验和数值仿真结果

图 5 显示了所制备试样的应力-应变曲线图。对于泡沫铝[14]，其典型应力-应变曲线(B 曲线)具有很长的应力平台区，这使得泡沫铝具有优良的吸能性能；对于 CMT(曲线 C)和 MTRF(曲线 A)，具有近似的压缩应力-应变曲线，可大致分为 5 个部分：①初始的弹性变形区；②非线性增加到第一个应力峰值；③应力值下降至最低点；④应力值呈波动式增加；⑤应力值急剧增加至密实化区域。其中 MTRF(曲线 A)，由于泡沫铝中填充有多胞管，结构的增强效果是显著的。首先，其抗压强度达到20.4 MPa，约为单一泡沫铝的 5.1 倍；其次，MTRF 的应力-应变(曲线 A)要明显高于分别单独测试的泡沫铝和 CMT 曲线的总和(曲线 D)，其中图 5 阴影区域表示的“A”和“D”曲线之间强的耦合增强效应，亦意味着 MTRF 能量吸收性能得到显著地提高。

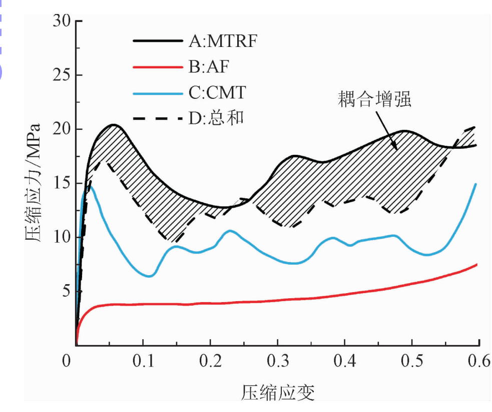


图 5　泡沫铝[14]、CMT 和 MTRF 试样的压缩应力-应变响应曲线图

Fig. 5　Compressive stress and strain response curves of foam[14], CMT and MTRF measured experimentally

图 6 为在准静态轴向加载下，CMT 和 MTRF 结构的轴向压缩实验与仿真压缩应力-应变对比图。进一步结合图 7 中试样的实验与仿真变形对比图可以看出，计算和实验获得的压缩应力-应变和变形模式基本是一致的。

图 7 为对应图 6 中不同名义应变下的 CMT 和 MTRF 两种试样的变形图。对于 CMT 结构：在名义应变为 0.05 时，应力达到峰值点，结构顶部位置发生首次轴对称屈曲；之后结构进入折叠压溃阶段，结构整体由于折叠发生软化坍塌，首次折叠部位下方出现颈缩，整体结构强度迅速下降，直到结构压缩至折叠部位相互接触密实，结构强度再次上升，此后结构在压缩中不断重复该阶段的变化特点，逐层折叠。总之，多胞圆管结构因为内部加强筋的存在，使该结构在局部的变形更为复杂，特别是十字加强筋与圆管的接触区域，可以明显地看到，由于加强筋与圆管壁的相互作用，在该区域产生了更多的塑性变形区。对于 MTRF 结构，由于多胞管填充在内部，无法观察到其变形，但从外部可以看出，在压缩起始段，鼓包发生在 MTRF 结构的中间偏下处，并主导了随后的变形过程。

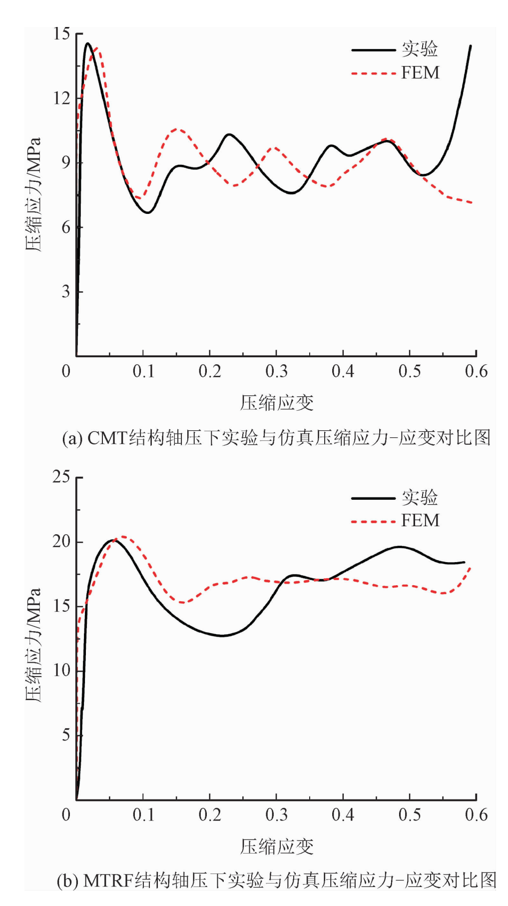


图 6　CMT 和 MTRF 结构的轴向压缩实验与仿真压缩应力-应变对比图

Fig. 6　Comparison of the compressive response of EMT and FMTF between numerical calculations and experimental measurements

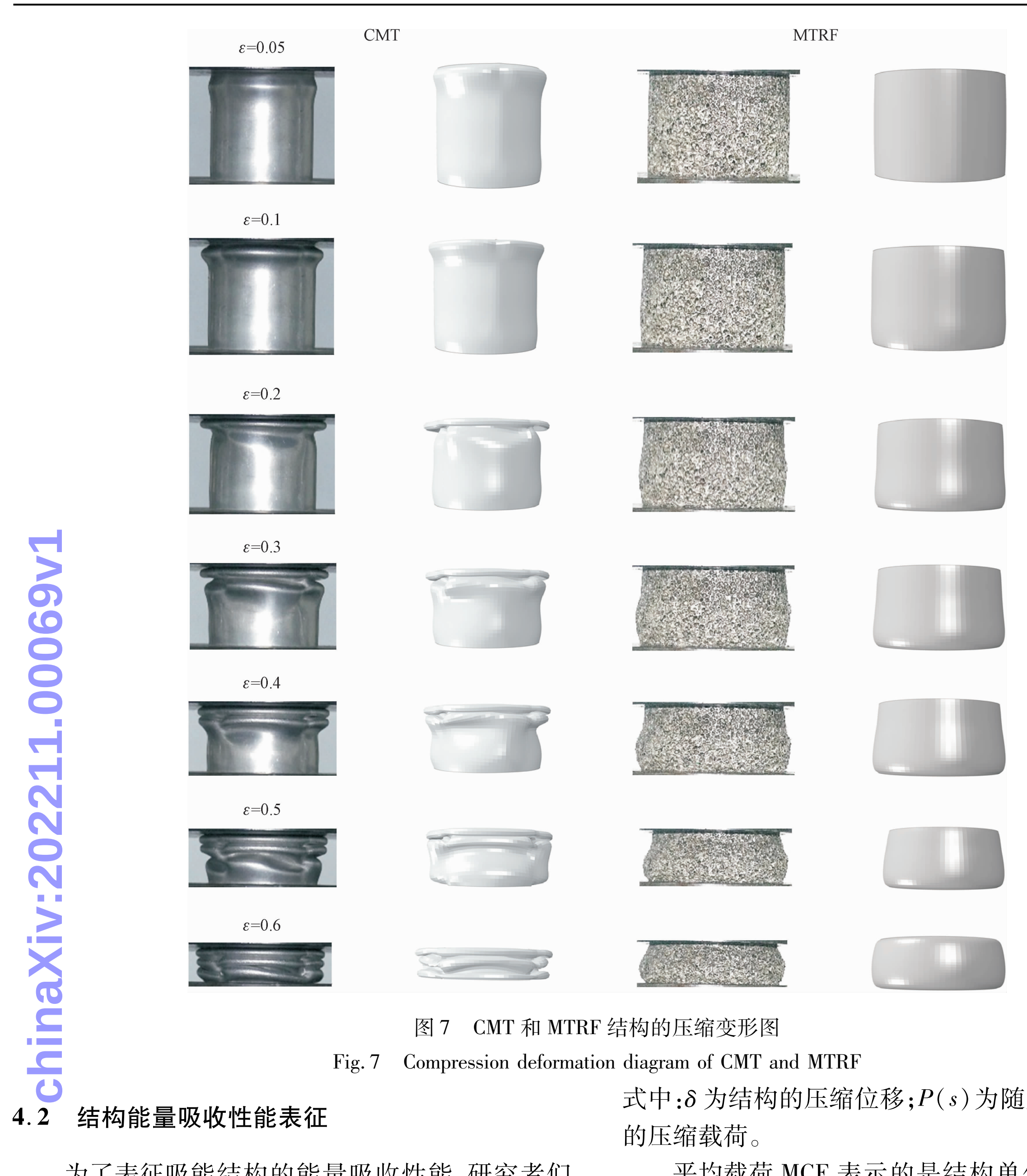


图7　CMT和MTRF结构的压缩变形图

Fig. 7　Compression deformation diagram of CMT and MTRF

4.2　结构能量吸收性能表征

为了表征吸能结构的能量吸收性能，研究者们定义了一系列的吸能评价参数，来评价结构能量吸收性能的优劣性，并以此来评价结构的耐撞性。主要参数有结构总质量能量吸收值(energy absorption，EA)、碰撞过程中结构平均载荷(mean crushing force，MCF)、峰值载荷P_m(peak load)、结构的整体冲击力效率(crushing force efficiency，CFE)和结构单位质量能量吸收值(specific energy absorption，SEA)，各参数具体定义如下。

结构总质量能量吸收EA表示的是结构材料在整个压缩过程中所吸收的总能量。

$$\mathrm{EA}=\int_0^\delta P(s)\,\mathrm{d}s \tag{1}$$

式中：δ为结构的压缩位移；$P(s)$为随压缩位移变化的压缩载荷。

平均载荷MCF表示的是结构单位距离变形所吸收的能量大小，其值越高，结构能量吸收率越好。

$$\mathrm{MCF}=\frac{\int_0^\delta P(s)\,\mathrm{d}s}{\delta} \tag{2}$$

结构的冲击力效率CFE是指平均载荷MCF与结构峰值力P_m的比值，用来评价结构峰值载荷与平均载荷的一致性，其值越接近1，两者越一致，结构吸能越稳定，侧面反映了结构能量吸收性能越好。

$$\mathrm{CFE}=\frac{\mathrm{MCF}}{P_m} \tag{3}$$

结构单位质量能量吸收SEA表示的是单位质量结构材料在整个压缩过程中所吸收的总能量，经常用来评价结构的材料利用率，其值越高越好。

$$\mathrm{SEA} = \frac{\int_0^{\delta} P(s)\,\mathrm{d}s}{m} \tag{4}$$

式中 m 为结构质量。

由表 3 可以看出,在 5 个能量吸收评价参数数值上,所提出的 MTRF 复合结构都要明显高于现有的泡沫铝,进一步表明了 MTRF 结构优越的承载能力和能量吸收性能。从结构的单位质量能量吸收 SEA 方面看,MTRF 复合结构比现有的泡沫铝提升了约 7 倍。从表中还可以看出,虽然 MTRF 的单位质量能量吸收 SEA 低于 CMT 结构,但其余 4 个能量吸收评价参数,MTRF 均要明显优于单一的 CMT 结构。

表 3　试样结构能量吸收性能表征

Tab. 3　Characteristics of structural crash worthiness performances of specimens

试件	吸能评价参数				
	P_m/kN	EA/J	MCF/kN	CFE/%	SEA/(J·g^{-1})
CMT	22.8	457.59	36.51	61.31	27.621
MTRF	40.92	835.59	50.66	80.67	13.743
AF	5.41	86.31	12.30	43.79	1.948



4.3　增强机理

为了进一步研究多胞管填充对泡沫铝承载和吸能的增强机理,采用有限元方法分别建立了加筋壁和圆管壁的局部坐标系,如图 8 所示。

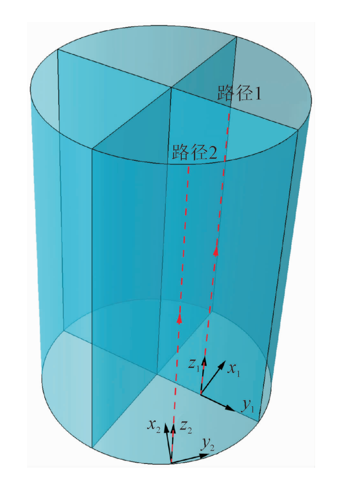


图 8　确定多壁管胞中加筋壁和圆管壁的局部坐标系

Fig. 8　Definition of local coordinates of multi-walled tube cell walls

具体分析结果见图 9,其中横坐标 z/l 为沿路径 1 方向任意点的相对位置,纵坐标 x/l 为沿路径 2 方向任意点 x 方向的相对横向挠度。

图 9(a)为 CMT 与 MTRF 中加筋壁沿路径 1 方向节点的相对横向挠度曲线对比图。首先,在名义应变偏小时(ε=0.1, 0.2),MTRF 的横向挠度曲线中波的个数与 CMT 相同,且由均为 1 个波(ε=0.1)增加到均为 2 个波(ε=0.2),曲线中波的个数代表了轴向压缩下圆管壁和加筋壁产生塑性铰的个数;然而当名义应变 ε=0.3 时,MTRF 曲线中有 4 个塑性铰,CMT 为 3 个;进一步地当名义应变 ε=0.4 时,MTRF 曲线中有 7 个塑性铰,CMT 却仅有 5 个。可以看出,在相同的名义应变下,随着名义应变的增大,MTRF 的横向挠度曲线中塑性铰的个数逐渐比 CMT 多。图 9(b)为 CMT 与 MTRF 中圆管壁沿路径 2 方向节点的相对横向挠度曲线对比图,类似地,随着名义应变的增大,MTRF 沿路径 2 方向的横向挠度曲线中塑性铰的个数也是逐渐多于 CMT。

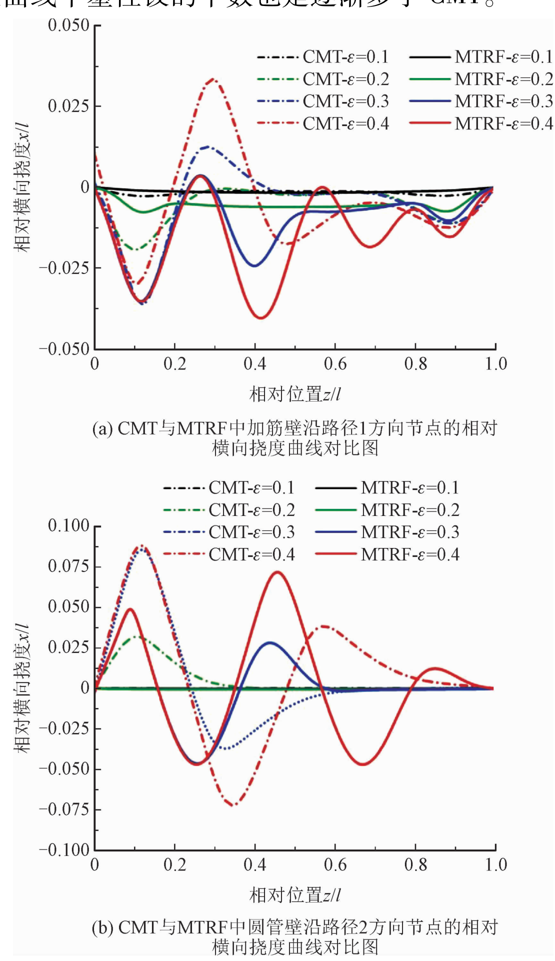


图 9　CMT 与 MTRF 结构的沿路径方向节点的相对横向挠度曲线图

Fig. 9　Relative lateral deflection curves of CMT and MTRF structures along path directions

本研究提出的 MTRF 结构中,泡沫铝给多胞管提供了足够强的侧向支撑,使其在压缩载荷作用下发生的横向变形受到了抑制,从而使得各自的变形模式发生改变,由低阶失稳模式转变为单一结构所不具备的更高阶的失稳模式,表现为塑性铰数目的

增多,而塑性较的产生需要更大的压缩应力,这是导致 MTRF 结构吸能和承载得到提高的原因。

5 结 论

本研究提出了一种新型多胞管增强泡沫铝结构(MTRF)。首先,采用挤压成型和电火花切割技术制备了 MTRF 结构,然后结合实验与数值方法研究了其准静态压缩特性和吸能性能。结果表明:①与泡沫铝相比,多胞管增强泡沫铝复合结构的抗压强度和单位质量吸能性能分别提升了 500% 和 700%,显示了 MTRF 结构优越的承载能力和能量吸收性能;②有效利用十字型多胞管优良的轴压承载力和泡沫铝提供的侧向支撑(内外支撑)限制多胞管低阶失稳,使多胞管由低阶失稳模式转变为单一结构所不具备的更高阶的失稳模式。

参考文献:

[1] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in materials science, 2001, 46(6): 559-632.

[2] LIANG X, LUO H, MU Y, et al. Experimental study on stress attenuation in aluminum foam core sandwich panels in high-velocity impact[J]. Materials letters, 2017, 203(15): 100-102.

[3] GARCIA M F. Commercial applications of metal foams: Their properties and production[J]. Materials, 2016, 9(2): 85.

[4] 张钱城,卢天健,何思渊,等. 闭孔泡沫铝的孔结构控制[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 7-22, 104.
ZHANG Qiancheng, LU Tianjian, HE Siyuan, et al. Control of pore morphology in closed-celled aluminum foams[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 7-22, 104 (in Chinese).

[5] SUN Y, ZHANG X, SHAO Z, et al. Image-based correlation between the meso-scale structure and deformation of closed-cell foam[J]. Materials science and engineering A, 2017, 688(14): 27-39.

[6] KENNEDY A R, ASAVAVISITCHAI S. Effects of TiB_2 particle addition on the expansion, structure and mechanical properties of PM Al foams[J]. Scripta materialia, 2004, 50(1): 115-119.

[7] DU Y, LI A B, ZHANG X X, et al. Enhancement of the mechanical strength of aluminum foams by SiC nanoparticles[J]. Material letters, 2015, 148(1): 79-81.

[8] BROTHERS A H, SCHEUNEMANN R, DEFOUW J D, et al. Processing and structure of open-celled amorphous metal foams[J]. Scripta materialia, 2005, 52(4): 335-339.

[9] SALEHI A, BABAKHANI A, MOJTABA Z S. Microstructural and mechanical properties of Al-SiO_2 nanocomposite foams produced by an ultrasonic technique[J]. Materials science and engineering A, 2015, 638: 54-59.

[10] WANG Q, FAN Z, SONG H, et al. Experimental and numerical analyses of the axial crushing behaviour of hat sections partially filled with aluminum foam[J]. International journal of crash worthiness, 2005, 10(5): 535-543.

[11] HANSSEN A G, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M. Bending of square aluminum extrusions with aluminum foam filler[J]. Acta mechanica, 2000, 142(1/2/3/4): 13.

[12] XU J L, YANG X D, HE C N, et al. Crushing behavior and energy absorption property of carbon nanotube-reinforced aluminum composite foam-filled 6061 aluminum alloy tubes[J]. Journal of materials science, 2020, 55(18): 7910-7926.

[13] YANG X D, AN T, WU Z Q, et al. The effect of outer tube on quasi-static compression behavior of aluminum foam-filled tubes[J]. Composite structures, 2020, 245: 112357.

[14] 杨旭东,安涛,冯晓琳,等. 泡沫铝填充碳纤维增强树脂复合材料薄壁管的压缩变形行为与吸能特性[J]. 复合材料学报, 2020, 8: 1850-1860.
YANG Xudong, AN Tao, FENG Xiaolin, et al. Compressive deformation behavior and energy absorption of Al foam-filled carbon fiber reinforced plastic thin-walled tube[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2020, 8: 1850-1860 (in Chinese).

[15] PANDARKAR A, GOEL M D, HORA M S. Axial crushing of hollow and foam filled tubes: An overview[J]. Sadhana: Academy proceedings in engineering science, 2016, 41: 909-921.

[16] CHEN W, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption[J]. Thin-walled structures, 2001, 39(4): 287-306.

(编辑 张璐)